



②1 Aktenzeichen: P 39 31 970.9
②2 Anmeldetag: 25. 9. 89
④3 Offenlegungstag: 4. 4. 91

DE 3931970 A1

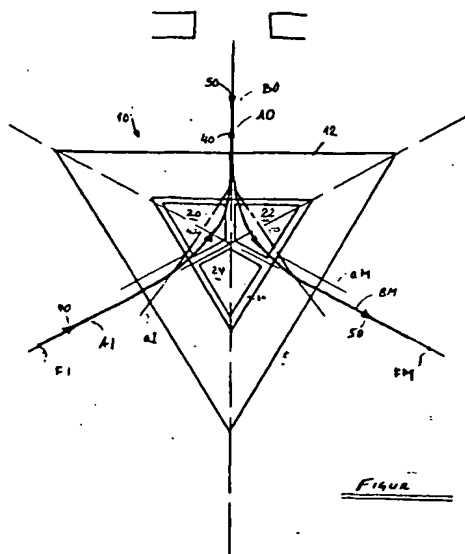
⑦1 Anmelder:
Röthele, Stephan, 3392 Clausthal-Zellerfeld, DE

⑦4 Vertreter:
Wuesthoff, F., Dr.-Ing.; Frhr. von Pechmann, E.,
Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.; Behrens, D., Dr.-Ing.; Goetz,
R., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.; Hellfeld von, A.,
Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte; Würtenberger,
G., Rechtsanw., 8000 München

⑦2 Erfinder:
Veneklasen, Lee, Castro Valley, Calif., US

⑤4 Sektorfeldablenksystem, insbes. für ein Niederspannungselektronen-Mikroskop

Ein Sektorfeldablenksystem, insbes. für ein Niederspannungselektronen-Mikroskop weist einen gleichförmig erregbaren äußeren Polschuh (12) auf, der zwei oder mehrere identisch gestaltete innere, ebenfalls zu erregende Polschuhe (20, 22, 24) umschließt, deren Erregung sich von der Erregung des äußeren Polschuhs unterscheidet und eine stigmatische Doppelfokussierung liefert.



DE 3931970 A1

Die Erfindung betrifft ein Sektorfeldablenksystem mit drei oder mehr Magnetsektoren bzw. -Schuhen, insbes. ein für Niederspannungselektronen-Mikroskop aber auch für Spektrometer oder dergl., welches mittels elastischer oder inelastisch gestreuter Elektronen oder Ionen abbildet. Es ist ferner geeignet für bestimmte Formen von Ablenkeinrichtungen zum Studium von Teilcheneigenschaften. Ein Niederspannungselektronenmikroskop, bei dem die Erfindung eingesetzt werden kann, ist von E. Bauer im Jahre 1962 angegeben worden. Ein Sepektrometer, für das das neue Sektorfeldablenksystem geeignet ist, ist vom Castaing-Henery-Typ.

Niederspannungselektronen-Mikroskope (Low Energy Electron Microscopes (LEEM)) beleuchten die zu untersuchende Oberfläche mit parallelen Elektronenstrahlen, die durch eine Objektivlinse, insbes. eine Objektivkathodenlinse kollimiert werden, die so ausgerichtet ist, daß deren Achse rechtwinkelig zur zu untersuchenden Probe steht. Längs der Beleuchtungsachse reflektierte Elektronen werden wieder beschleunigt und fokussiert und dienen zur Erzeugung eines Abbildes der Struktur, Topologie und/oder der chemischen Eigenschaften der beobachteten Oberfläche. Derartige Elektronen-Mikroskope haben eine sogenannte magnetische Sektorablenkeinheit (Separator), die es gestattet, ein Beleuchtungsstrahlenbündel auf einer Seite der Ablenkeinheit einzuleiten und in die Achse der Objektivlinse bzw. Kathodenlinse abzulenken. Das reflektierte Ablenkungsstrahlenbündel verläuft entlang der gleichen Achse der Kathodenlinse, wird aber aufgrund des Umstandes, daß die Elektronengeschwindigkeit reverts wurde, in der Ablenkeinheit aus der Beleuchtungsachse weg in die Achse eines Abbildungssystems mit Verstärkungslinsen und dergl. gelenkt, das das Abbild der beobachteten Oberfläche erzeugt. Ein wesentliches Merkmal dieses Ablenkensystems ist es, daß die zur Beleuchtung und Abbildung dienenden optischen Einheiten räumlich getrennt sein können und so ein sonst nicht lösbares Problem der Beleuchtung und Abbildung vermeide.

Für eine optimale Betriebsweise sollte die Ablenkeinheit verschiedene bestimmte Eigenschaften aufweisen. Wenn alle Linsensysteme fixiert sind, muß sichergestellt sein, daß die Mittelachse sowohl des Beleuchtungs- als auch des Abbildungsstrahlengangs bestimmten genau festgelegten Wegen außerhalb des Bereichs der Sektorablenkeinheit folgen, und dadurch zu erreichen, daß die beiden Strahlenbündel der Objektivlinse der Optik längs der gleichen Achse in die Ablenkeinheit ein- und austreten. Das Ablenkensystem muß ferner ein fokussiertes Abbild der Elektronenstrahlquelle auf einen Punkt gerade oberhalb der Objektivkathodenlinse abbilden und es muß ferner ein fokussiertes Abbild auf einen symmetrisch angeordneten Punkt längs des Abbildungsstrahlengangs durchlassen. Zur Vermeidung von Verzerrung und Astigmatismus ist es ferner wünschenswert, daß das Sektorfeldablenksystem stigmatisch oder doppelbrechend ist. Das bedeutet, daß es einen Punkt oberhalb des Objektivs in einen anderen Punkt außerhalb der Ablenkeinheit fokussiert, unabhängig davon, ob sich die Elektronen längs der horizontalen oder vertikalen Ebene der Polschuhe der magnetischen Ablenkeinheit bewegen. Ferner sollte die Sektorablenkeinheit in der Lage sein, die zuvor genannten Erfordernisse auch dann erfüllen, wenn Beleuchtungsstrahlenbündel und Abbildungsstrahlenbündel unterschiedliche Energien haben. Diese zuletzt genannte Eigenschaft ist vor

allen Dingen wichtig, wenn inelastische Elektronen, nämlich solche, die Energie an die zu untersuchende Probe verlieren, zur Abbildung verwendet werden.

Sektorablenkeinheiten umfassen bisher einen einzigen festen Polschuh, der so geformt ist, daß die gewünschte Ablenkung erzielt wird. Der Krümmungsradius der abgelenkten Strahlenbündel und deren Neigung gegenüber den Randgrenzen der Magnetsektoren bestimmen die Eigenschaften der Sektorablenkeinheit. Es sind auch Ausführungsformen bekannt, bei denen in einem einzigen Polschuh ausgeschnittene Bereiche vorgesehen sind, um den erwünschten Strahlengang zu erzielen. Um Symmetrie zwischen dem auftreffenden Beleuchtungsstrahlenbündel und dem austretenden Abbildungsstrahlenbündel sicherzustellen, müssen alle drei äußeren Kanten rechtwinkelig zu den Strahlenbündelachsen außerhalb der Ablenkeinheit stehen, während die Innenflächen eines einzelnen Polschuhs prinzipiell derart ausgebildet sein können, daß eine symmetrische, stigmatische Abbildung erzeugt wird. Unabhängig davon, wie vorteilhaft sich die bekannten Ablenkeinheiten betreiben lassen, darf nicht übersehen werden, daß derartige einteilige Polschuhausbildungen grundsätzlich nicht in der Lage sind, eine Vielzahl unterschiedlicher Abbildungsstrahlenbündelenergien zu beherrschen, während nur ein Beleuchtungsstrahlenbündel mit einer einzigen bestimmten Energie zur Anwendung kommt. Das eine oder andere Strahlenbündel muß sich von der gewünschten an sich festgelegten Strahlengangachse entfernen, da unterschiedliche Energien zu unterschiedlichen Krümmungsradien im gleichen Magnetfeld führen. Wenn es auch theoretisch möglich ist, eine Reihe von entsprechend geformten Ablenkeinheiten mit mehreren Symmetrieachsen zur Erzielung des gewünschten stigmatischen und nicht-dispersiven Abbildungsverhaltens zu verwenden, würden derartige Ablenkensysteme außerordentlich kompliziert werden. Solche Systeme mit symmetrisch gekrümmten Ein- und Ausfallachsen gehören zum Stand der Technik.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Sektorfeldablenksystem zu schaffen, daß die an es gestellten, zu vorgenannten Anforderungen bei vergleichsweise einfachem Aufbau erfüllt und sich auch bei inelastisch gestreuten Elektronen oder sich energetisch unterscheidenden Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlenbündeln dennoch stigmatisch doppelfokussierend verhält. Schließlich soll das Ablenkensystem sowohl mit elastischen als auch inelastisch gestreuten Elektronen oder Ionen betrieben werden können.

Ein diese Aufgabe lösendes Sektorfeldablenksystem ist mit Ausgestaltungen in den Patentansprüchen gekennzeichnet und anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert.

Das Sektorfeldablenk-System gemäß der Erfindung hat einen gleichförmig erregten äußeren Polschuh, der zwei oder mehr identisch gestaltete, symmetrisch angeordnete innere Polschuhe umschließt, die durch ein Feld erregt werden, das sich von dem äußeren Erregungsfeld unterscheidet, und eine stigmatische Doppelfokussierung liefert. Die Ablenkeinheit bildet mit elastischen oder inelastischen gestreuten Elektronen oder Ionen ab. Der äußere Polschuh bzw. das äußere Polstück wird gleichmäßig erregt.

Eine Ausgestaltung der Erfindung sieht vor, daß wenigstens einer der Polschuhe gegenüber den anderen unterschiedlich erregt werden kann, um Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlenbündel zu erhalten, die außerhalb des Ablenkensystems spiegelbildlich sind, auch wenn

das Beleuchtungsstrahlenbündel und das Abbildungsstrahlenbündel unterschiedliche Energien haben.

Bei einer anderen Ausgestaltung des erfindungsge-
mäßigen Sektorfeldablenksystems ist ein innerer Pol-
schuh mit unterschiedlicher Stärke gegenüber den an-
deren inneren Polschuhen erregbar. Es kann jedoch auf
einem inneren Polschuh auch eine zusätzliche Spule
vorgesehen sein, die bei Erregung eine entgegengerich-
tete Feldkomponente erzeugt. In beiden Fällen führt
dies zu einer quadropolen Fokussierung längs einer ein-
zigen Achse oder längs beider Achsen.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist anhand ei-
ner Zeichnung näher erläutert, die eine Sektorfeldab-
lenkeinheit im Querschnitt zeigt.

Ein Sektorfeldablenksystem 10 umfaßt einen dreieck-
förmigen äußeren Polschuh 12 mit einer mittigen drei-
eckigen Durchgangsöffnung und in dieser — gemäß der
Erfindung — symmetrisch angeordnet drei innere
gleichgeformte Polschuhe 20, 22 und 24, die durch einen
Luftspalt 26 vom äußeren Polschuh getrennt sind und
einen Ablenkwinkel von 60° erzeugen. Der äußere drei-
eckförmige Polschuh 12 umschließt also sowohl die in-
neren Polstücke 20, 22 und 24 als auch die im Quer-
schnitt dreieckförmige dreifach-symmetrische Anord-
nung der inneren Polschuhe. Der äußere Polschuh 12
wirkt mit einem gleichförmigen Magnetfeld auf die Be-
leuchtungsstrahlenbündelsegmente AI und AO und auf
die Abbildungsstrahlengangsegmente BO und BM. Die
Strahlenbündelsegmente AI und BM müssen entlang
dem gleichen spiegelsymmetrischen Strahlengang ver-
laufen, während die Strahlenbündelsegmente AO und
BO außerhalb des Ablenksystems 10 überlagert sind.
Die inneren Polschuhe 20, 22 und 24 sind identisch ge-
formt, so daß sie innerhalb des äußeren Polstücks 12
zueinander passen. Die inneren Kanten sind so ausge-
richtet, daß sie längs jeder Strahlenachse ausgerichtet
sind. Die inneren und äußeren Kanten des äußeren Pol-
schuhs 12 verlaufen parallel miteinander und senkrecht
zur außenliegenden Strahlenachse. Dies ist aber keine
notwendige Anordnung der inneren Kanten der inneren
Polschuhe 20, 22 und 24. Letztere können unabhängig
voneinander durch getrennte Erregerspulen erregt wer-
den, um beliebige Felder längs einer rechtwinkelig zu
einer Achse zu erzeugen, die rechtwinkelig zum Zei-
chenblatt steht. Es wird angenommen, daß die einander
zugewandten Polstückpaare, die den Ablenkungsspalt
der inneren Polstücke bestimmen, mit einer kleinen
Komponente eines entgegengerichteten Feldes erregt
werden können, so daß auch eine schwache Quadropol-
linse gebildet werden kann. Diese Quadropolkompo-
nenten dienen zur Korrektur residueller Astigmatismus-
ses und zwar getrennt für den Beleuchtungs- und den
Abbildungsstrahl.

Die nachfolgende Ausführungsform verdeutlicht, daß
es möglich ist, daß System doppelfokussierend bzw. stig-
matisch zu machen, selbst wenn die exakten Eigenschaf-
ten nicht zuvor errechnet werden können. Die Literatur
zeigt, daß die Fokussiereigenschaften jeder Sektorfeld-
ablenkeinheit vom Krümmungsradius des Strahls (Erre-
gung) und der Neigung der Strahlachse α_1 und α_M ge-
genüber der Grenze jedes Sektors beim Ein- und Aus-
tritt des Sektors abhängt. Wenn nur das äußere Polstück
12 erregt wird und dessen innere und äußere Kanten
parallel zueinander verlaufen, dann ist in der Literatur
ausgeführt, daß das System außerhalb der Achse verlau-
fende Elektronenstrahlen in vertikaler Richtung aber
nicht in horizontaler Richtung fokussieren wird (Frak-
tion). Wenn jedoch nur die inneren Polschuhe alle gleich

erregt werden, treten alle zentralen Strahlen rechtwin-
kelig zu den aktiven Polschuhgrenzen ein und aus. In der
Literatur ist ausgeführt, daß das System dann in der
horizontalen Ebene fokussieren wird aber nicht in der
vertikalen Ebene. In beiden Fällen verlaufen die Strah-
lengänge der längs der Achse verlaufenden Elektronen-
strahlen AI, AO, BO, BI identisch zueinander, selbst
wenn sie davon abhängen, welcher Polschuh erregt ist.
Wenn sowohl der äußere Polschuh 12 als auch die inne-
ren Polschuhe 20, 22, 24 erregt sind, erfolgt eine Foku-
sierung sowohl in der horizontalen Ebene als auch in der
vertikalen Ebene und die Symmetrie der Strahlengangs-
segmente ist gesichert. Daraus folgt, daß eine stigmati-
sche Fokussierung erzielbar ist. Wenn ein Objektpunkt
FI korrekt angeordnet ist, werden seine konjugierten
Bildpunkte FO und FM mit einem Vergrößerungsfaktor
von minus 1 (−1) stigmatisch abbildet. Mit anderen
Worten, differentielle Erregung der inneren Polschuhe
und des äußeren Polschuhs hat die Wirkung einer Ände-
rung der effektiven Fokussierstärke der inneren Pol-
schuhgrenzen derart, daß eine Fokussierung sicherge-
stellt ist. Aufgrund der internen Symmetrie des Beleuch-
tungs- und des Abbildungsstrahlenbündels ist sicherge-
stellt, daß die von chromatischer Aberration freien
Punkten in der Mitte des Systems liegen, nämlich dort,
wohin die Probe abgebildet wird.

Aus dem Vorhergehenden ergibt sich, daß das magne-
tische Sektorfeldablenksystem 10 grundsätzlich doppel-
fokussierend für eine einzige nominale Strahlenergie ist.
Wenn sich jedoch die Energie des Abbildungsstrahlen-
bündels AI—AO vom Beleuchtungsstrahlenbündel
BO—BM unterscheidet, kann z.B. der innere Polschuh
22 etwas abweichend erregt werden, um ihn wieder zur
gewünschten Austrittsachse zu drängen. Während sich
die Form des Strahlengangs ändert (für geringere Ener-
gien wird er im äußeren Polstück stärker gekrümmt und
für entsprechend gerader im inneren Polschuh) stellt die
Symmetrie der Strahlengänge BO nach BM sicher, daß
er längs der Abbildungsachse austritt. Es kann gezeigt
werden, daß die Abbildungsbedingungen sich etwas än-
dern und ein geringer Astigmatismus auftritt, da das
Verhältnis von innerer zu äußerer Erregung verschie-
den ist. Diese Abweichung kann durch die eingebaute,
zuvor erläuterte Quadropolanordnung korrigiert wer-
den. Für kleine Energiedifferenzen ist die Wirkung auf
den Bildastigmatismus vernachlässigbar, wenn er an den
achromatischen Punkten liegt.

Die Symmetrie der Anordnung kann eine 3, 4- oder
5-fache sein.

Bei einem praktischen Ausführungsbeispiel des Sek-
torfeldablenksystems der Erfindung betrug die äußere
Kantenlänge des äußeren dreieckförmigen Polschuhs 12
150 mm, die Feldstärke der Polschuhe je 100 Ampère-
Windungen (Gauss), die Brennweite (Abstand der Bild-
punkte FI und FM) vom Mittelpunkt 200 mm, und lag FI
symmetrisch zu FM.

Bei unterschiedlicher Erregung des Beleuchtungs-
strahls BO—BM und des Abbildungsstrahls AI—AO än-
dert sich die Feldstärke proportional der Quadratwur-
zel der Energiedifferenz. Dazu kann die Erregungs-
stromstärke unterschiedlich sein oder es ist eine zusätz-
liche Spule auf dem einen Polschuh vorgesehen. Die
Brennweite ändert sich bei geringen Erregungsdifferen-
zen nur geringfügig. Leichter Astigmatismus kann auf-
treten.

Die in der Zeichnung dargestellte 4-Magnet-Ausfüh-
rung (die Magnete sind vornehmlich Elektromagnete,
wenn auch Permanentmagnete verwendbar sind) erzeu-

gen gemeinsam zwei entgegengerichtete Felder, die einen Sattel der Feldstärkenverteilung in der Mitte bilden.

Die Magnete bestehen aus Eisen hoher Permeabilität und geringer Remanenz. Abmessungen des äußeren Polschuhs von ca. 75 bis 150 mm kommen in Betracht. 5
Zur Stromversorgung dient ein stromgeregeltes Netzgerät.

Patentansprüche

1. Sektorfeldablenksystem mit drei oder mehr Magnetsektoren bzw. -Schuhen, insbesondere für ein Niederspannungselektronen-Mikroskop, welches mittels elastischer oder inelastisch gestreuter Elektronen oder Ionen abbildet, **gekennzeichnet durch** 10
einen gleichförmig erregten äußeren Polschuh (12), der zwei oder mehrere identisch gestaltete innere, ebenfalls erregte Polschuhe (20, 22, 24) umschließt, deren Erregung sich von der äußeren Erregung unterscheidet und eine stigmatische Doppelfokussierung liefert. 15
2. Sektorfeldablenksystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens einer der Polschuhe unterschiedlich gegenüber den anderen Polschuhen derart erregbar ist, daß das Beleuchtungs- und das Abbildungsstrahlenbündel außerhalb des Ablenksystems spiegelbildlich verlaufen, auch wenn die Energie des Beleuchtungsstrahlenbündels unterschiedlich von der Energie des Abbildungsstrahlenbündels ist. 20 25 30
3. Sektorfeldablenksystem nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen gegenüber den anderen inneren Polschuhen unterschiedlich erregbaren inneren Polschuh oder eine zusätzliche Magnetspule auf einem der inneren Polschuhe, welche eine entgegengerichtete Feldkomponente erzeugt, die zu einer Quadropol-Fokussierung in einer der Achsen oder in beiden Achsen führt. 35
4. Sektorfeldablenksystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der äußere Polschuh (12) die Form eines gleichschenkeligen Dreiecks hat und die inneren Polschuhe (20, 22, 24) unter Belassung eines Spaltes (26) eine symmetrische Anordnung bildend umschließt. 40 45

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65

Nummer: DE 39 31 970 A1
 Int. Cl. 5: H 01 J 37/147
 Offenlegungstag: 4. April 1991

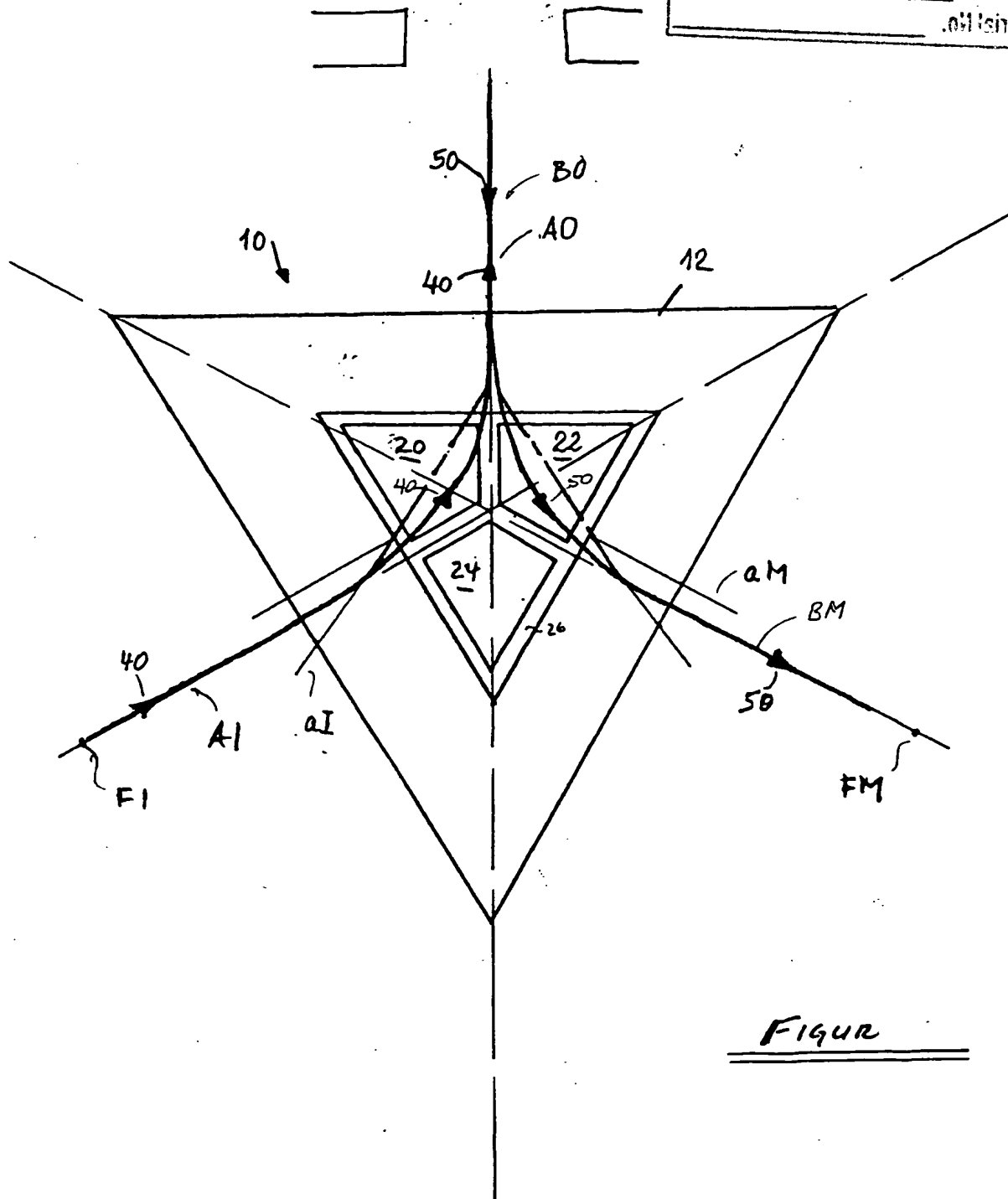
0328-823-102

0328-823-102

0328-823-102

0328-823-102

0328-823-102



Figur